بررسی تجربی تأثیر زبری سطح بر تشکیل برفک روی استوانه*

بهروز بهروزی[۱]		حسن بصیرت تبریزی[۲]		ابراهیم دامنگیر[۳]

چکیده *تشکیل برفک اثرات مهمی در بسیاری از زمینه‌ها ازجمله صنعت تبرید، تهویهٔ مطبوع، حمل‌ونقل هوایی و غیره دارد. هنگامی‌که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌شود. تشکیل برفک پدیدهٔ پیچیده‌ای است که انواع مکانیزم-های انتقال حرارت و جرم به‌طور هم‌زمان درحال وقوع است. در این کار به‌صورت تجربی، تأثیر زبری بر تشکیل برفک در استوانهٔ افقی تحت جریان جابه‌جایی اجباری مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای ایجاد جریان اجباری از تونل باد استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در جلوی استوانه کمینه می‌باشد. با ایجاد زبری بیشتر روی سطح میزان ضخامت برفک بیشتر می‌شود و هرچه سطح زبر ایجادشده دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری باشد میزان ضخامت برفک بیشتر خواهد بود.*

واژه‌های کلیدی استوانهٔ سرد، انتقال حرارت و جرم، برفک، جابه‌جایی اجباری، زبری دیواره.

Experimental Study of Wall Roughness Effects on the Frost Formation over a Cylinder

B. Behroozi		H. Basirat Tabrizi		E. Damangir

Abstract *Frost formation has important effects on many fields, such as refrigeration industry, air-conditioning, aviation, etc. The frost develops when a humid air contacts with a cooler surface at its freezing point. Frost formation is a complicated transient phenomenon in which a variety of heat and mass transfer mechanisms are taking place simultaneously. In this work, effect of roughness on frost formation over horizontal cylinder in force convection conditions was investigated experimentally. For creating the force flow field, a wind tunnel was used. Results indicated that the frost thickness behind the cylinder is at the maximum and in the front of cylinder is in the minimum. Further increasing of the wall roughness, result in the frost thickness increases and increasing the thermal conductivity coefficient of rough surface, increases the frost thickness too.*

Key Words Cold cylinder; Heat and mass transfer; Frost; Force convection; Wall roughness.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹٦/۱/٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
bbehroozi@mail.kntu.ac.ir

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

تشکیل برفک پدیدهٔ متداولی در مبدل‌های حرارتی در محیط سرد محسوب می‌شود. هنگامی‌که هوای مرطوب نزدیک سطح سرد به دمای زیر دمای انجماد آب برسد برفک تشکیل می‌گردد [1]. وجود برفک کم و بیش مشکلاتی را ایجاد می‌کند؛ ازجمله در مبدل‌های هوایی گرچه عملکرد حرارتی مبدل در مراحل اولیهٔ تشکیل برفک به‌دلیل افزایش سطح انتقال حرارت به‌میزان کمی افزایش می‌یابد ولی با گذشت زمان نه‌تنها این مشخصه از بین می‌رود، بلکه برفک به‌عنوان یک عایق حرارتی بین سطح سرد و جریان آزاد هوا عمل می‌نماید و مشخصه‌های انتقال حرارت را به‌شدت کاهش می‌دهد [2].

تشکیل برفک در وسیله‌های حمل‌ونقل نیز اثرهای قابل‌توجهی دارد. تشکیل برفک برروی بال‌های هواپیما وضعیت آیرودینامیکی آن را تغییر می‌دهد و اثر نامطلوبی بر حرکت هواپیما دارد. این معضل در صنعت حمل‌ونقل ریلی نیز وجود دارد که با یخ‌زدگی سوپاپ‌های ترمز سبب بروز مشکل در کنترل قطار می‌گردد و نیز در بزرگراه‌ها با یخ‌زدن سطح جاده موجب لغزندگی سطح می‌شود [3].

کارهای اولیه درزمینهٔ مرحلهٔ جوانه‌زنی برفک توسط فلچر [4] انجام گردید و مرحله‌های تشکیل برفک را به دو مرحلهٔ جوانه‌زنی و رشد کریستالی برفک تقسیم کرد. پروسهٔ جوانه‌زنی نیازمند آن است که جوانه‌ها بر انرژی گیبس تغییر فاز غلبه کنند و این زمانی رخ می‌دهد که جزء بخار در حالت فوق‌اشباع باشد. ساندرز [5] تحقیق‌های خود را برروی علت عدم یکنواختی تشکیل برفک روی سطح متمرکز کرد و بیان نمود که ناهماهنگی انرژی سطح، بر تشکیل اولیهٔ برفک اثرگذار است. راجو و شریف [6] به‌صورت تحلیلی تشکیل برفک و انتقال حرارت را در یک کانال دایروی بررسی کردند. آنها روابطی را برای به‌دست آوردن ضرایب مختلف ازجمله ضخامت برفک و چگالی برفک ارائه دادند. جواب‌های آنها به‌شدت به رابطهٔ ارائه‌شده برای چگالی وابسته بود و این امر دقت کار را کاهش می‌داد. امینی و همکاران [7] به بررسی تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک در مبدل لوله- پره با دمای 10-، 15- و 20- پرداختند. آنها برای شرایط محیطی مختلف، ضخامت و چگالی برفک را برحسب زمان به‌دست آوردند. چن و همکاران [8] به بررسی تجربی جابه‌جایی طبیعی تشکیل برفک در فشار پایین پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که فشار محیط نقش مؤثری بر تشکیل برفک دارد. کاهش فشار محیط باعث تأخیر در تشکیل برفک می‌شود و هرچه فشار کاهش یابد، کریستال‌های اولیهٔ تشکیل برفک شکل منظم‌تری به‌خود می‌گیرند.

کیم و همکاران [9] به بررسی میکروسکوپی مراحل اولیهٔ تشکیل برفک برروی سطح آب‌گریز پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش زاویهٔ تماس سطح، ارتفاع کریستال‌های اولیهٔ برفک بیشتر می‌شود و همچنین قطر کریستال و چگالی برفک کاهش می‌یابد. همچنین آنها رابطهٔ همبستگی برای تشکیل برفک ارائه کردند. لیو و همکاران [10] به بررسی تشکیل برفک روی سطح سرد کرایوژنیک در شرایط جابه‌جایی طبیعی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد اولین کریستال‌های برفک برای سطح کرایوژنیک در دمای سطح کمتر از 165- درجهٔ سانتی‌گراد رخ می‌دهد. جانگ و همکاران [11] به بررسی تجربی تأثیر هوای محیط و ذرات درون آن بر تشکیل برفک روی سطح صاف سرد پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد هرچه غلظت ذرات بیشتر باشد، ضخامت برفک و ارتفاع کریستال‌های تشکیل‌شده بیشتر می‌شود.

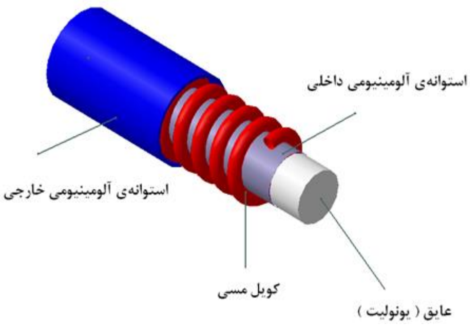
در این تحقیق به بررسی تجربی تأثیر زبری سطح برروی ضخامت برفک پرداخته شده‌است. همان‌گونه که در مقالات ذکر شده‌است، بیشتر تحقیقات برروی جریان طبیعی انجام شده و مطالعات کمی برروی

تشکیل برفک در جریان اجباری در تونل باد انجام گرفته‌است. در این مطالعه جریان اجباری ایجادشده در تونل باد و با درنظر گرفتن زبری سطح که در مقالات پیشینیان به آن نپرداخته‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بیان مسئله

در این تحقیق دمای سطح استوانه 14.6- درجهٔ سانتی‌گراد، دمای هوای محیط 25 درجهٔ سانتی‌گراد، رطوبت نسبی 45 درصد و سرعت جریان ورودی 0.3 متر بر ثانیه درنظر گرفته شده‌است و ضخامت برفک در بالا، جلو و پشت استوانه برای سطح صاف، سطح فولادی و سطح برنجی با زبری متفاوت بررسی شده‌است.

شرح دستگاه آزمایش. هستهٔ اصلی این آزمایش را یک تبخیرکننده به‌شکل استوانه تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۱ و ۲). تبخیرکننده 35 متر لولهٔ مسی نمرهٔ 8 می‌باشد و به دمای کمینهٔ 40- درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد. تمام اندازه‌های دیگر دستگاه تابع شکل و اندازهٔ تبخیرکننده است. مبرد مناسب استفاده‌شده برای شرایط این آزمایش، گاز R502 می‌باشد که باتوجه به خاص بودن گاز تنها یک نوع کمپرسور $\frac{3}{4}$ hp دانفوس (Danfus) ساخت آلمان غربی) سازگار با این گاز استفاده شده‌است (شکل ۳).



شکل ۱ شماتیک سه‌بعدی استوانهٔ تبخیرکننده



شکل ۲ نمایی از استوانه (تبخیرکننده)

همان‌گونه که در شکل (۳) نیز قابل مشاهده است، مبرد داغ خروجی از کمپرسور از سمت بالای چگالنده وارد می‌شود و پس‌از طی مسیر از سمت پایین چگالنده خارج می‌گردد. مبرد پس از خروج از چگالنده به حالت مایع مادون سرد می‌باشد. در اینجا برای افت فشار و دمای مبرد، آن را از یک وسیلهٔ اختناق عبور می‌دهند. این وسیله می‌تواند یک شیر انبساط و یا یک لولهٔ موئین با طول زیاد باشد. لولهٔ موئین معمولاً در سیستم‌های با کمینه دمای 15- درجهٔ سانتی‌گراد استفاده می‌شود؛ اما در سیستم‌هایی که نیاز به دمای کمتری دارند از شیر انبساط استفاده می‌شود. شیر انبساط در مسیر مبرد خروجی از چگالنده قرار می‌گیرد. دهانهٔ اریفیس شیر انبساط، به دو ترتیب قابل کنترل است. یکی بااستفاده از یک پیچ دستی که در بیرون شیر قرار دارد و برای تنظیم توان عبور دهی مبرد (و درنتیجه توان سیستم) استفاده می‌شود و دیگری به‌وسیلهٔ اکولایزر.



شکل ۳ شماتیک کمپرسور و کندانسور

اکولایزر یک ترموستات است که سر حسگر آن را در جای مناسب قرار می‌دهند. (در اینجا به ابتدای لولهٔ خروجی تبخیرکننده وصل شده‌است.) در موقع کار کردن سیستم، این قسمت با حس کردن سرمای محل قرارگیری خود، می‌تواند پیام بسته شدن یا باز شدن کامل را به اریفیس بدهد. با این کار دبی جریان مبرد به درون تبخیرکننده و درنتیجه سرمای آن قابل کنترل است. مسیر خروجی شیر انبساط به درون تبخیرکننده قرار دارد.

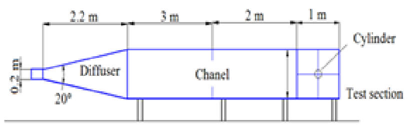
تونل باد. برای ایجاد جریان اجباری از تونل باد استفاده شده‌است. تونل باد از چهار قسمت اصلی تشکیل می‌شود:

- بخش تست و محل قرارگیری استوانهٔ مورد آزمایش، کانال‌ها و نازل، محفظهٔ کنترل جریان و وسیله‌های اندازه‌گیری.
- بخش تست و محل قرارگیری استوانهٔ مورد آزمایش

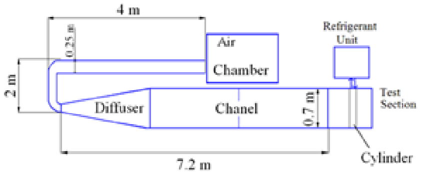
طول استوانهٔ مورد بررسی 70 سانتی‌متر و قطر آن 15.6 سانتی‌متر می‌باشد. بخش تست که استوانهٔ مورد بررسی در آن قرار دارد، دارای عمق، ارتفاع و طول به‌ترتیب 70، 90 و 80 سانتی‌متر است (شکل ۲). این قسمت از یک اسکلت از جنس نبشی آهنی ساخته شده و در کف آن ورق گالوانیزه قرار گرفته‌است. در سه سمت دیگر آن برای سهولت در دید از ورقه‌های پلکسی گلاس استفاده شده‌است. همچنین برای دسترسی آسان به استوانه و نصب وسایل اندازه‌گیری، یک سمت آن دری لولادار درنظر گرفته شده‌است.

کانال‌ها و نازل. باتوجه به این‌که این مجموعه (استوانه و بخش تست) باید به کانال موجود در آزمایشگاه انرژی متصل گردد تا سیرکولاسیون هوا صورت گیرد ساخت کانال صورت گرفت. طول این کانال 5 متر و سطح مقطع آن 90 در 70 سانتی‌متر می‌باشد. این کانال از اسکلتی از نبشی آهنی و با بدنه‌ای از ورق گالوانیزه ساخته شده‌است (شکل ٤– الف). همچنین یک دیفیوزر با زاویهٔ 10 درجه و طول 2.2 متر به کانال اولیه اضافه شده‌است (شکل ٤– الف). برای جلوگیری از ورود مستقیم جریان از فن به درون کانال، بااستفاده از یک کانال به‌شکل U به‌طول 2 متر و سطح مقطع 20 در 25 و اتصال یک سر آن به دیفیوزر و سر دیگر آن به یک کانال 4 متری با سطح مقطع 20 در 25 (این کانال به‌صورت موازی با کانال بزرگتر نصب شده‌است نه به‌صورت سری) و اتصال مجموعهٔ فن به آنها، تا حد فوق‌العاده زیادی از ورود نوسان‌های فن به درون کانال جلوگیری شد و جریان درون کانال به یکنواختی لازم رسید (شکل ٤– ب).

الف)



ب)



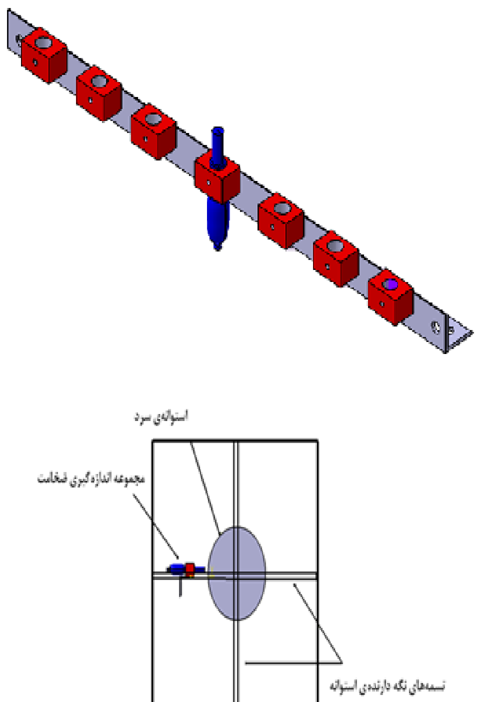
شکل ٤ الف) نمای روبه‌روی دستگاه تونل باد، ب) نمای بالای دستگاه تونل باد

محفظهٔ کنترل جریان. برای تولید جریان با شرایط ورودی‌های دلخواه از یک محفظهٔ مکعبی استفاده شده‌است که درون آن یک فن با توان 1.5 اسب بخار و تک‌فاز قرار دارد. برای ایجاد رطوبت مورد نیاز در جریان اجباری هوای مرطوب از یک لولهٔ پلاستیکی که دارای منفذهای بسیار ریز می‌باشد استفاده شده‌است.

وسایل اندازه‌گیری. در انجام آزمایش‌های مربوط به رشد برفک، پارامترهای گوناگونی وجود دارد که برخی از آنها مثل سرعت هوا باید پیش از شروع آزمایش

تنظیم شوند و در طول آزمایش دیگر نیازی به کنترل ندارند. در این آزمایش اندازه‌گیری سرعت جریان هوا توسط یک سرعت‌سنج توربینی انجام شده‌است.

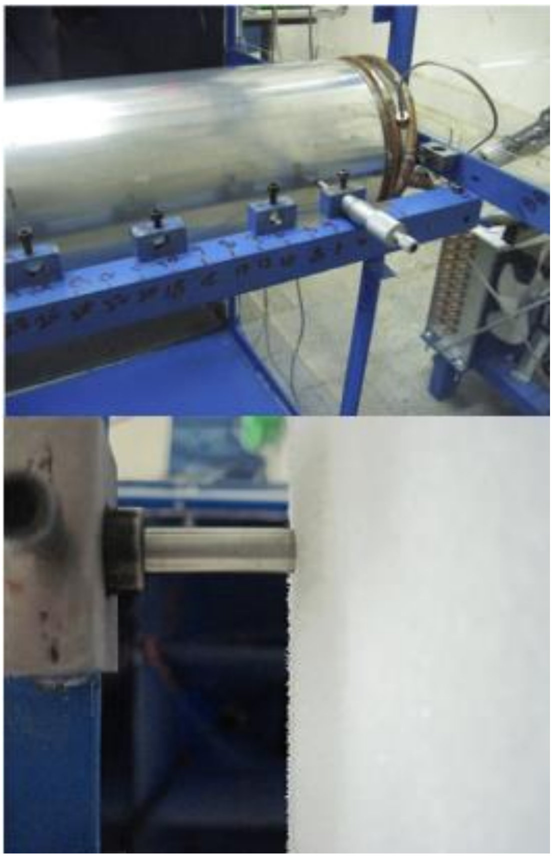
ضخامت برفک. برای اندازه‌گیری ضخامت برفک در ابتدا و قبل از برفک زدن سطح استوانه، عمق‌سنج با دقت ± 0.01 mm برروی نبشی (نگه‌دارندهٔ عمق‌سنج) در جای خود ثابت می‌شود و فاصلهٔ نبشی از سطح استوانه خوانده می‌شود (شکل ۵ وسیلهٔ اندازه‌گیری ساخته‌شده برای اندازه‌گیری ضخامت برفک و محل قرارگیری آن را نشان می‌دهد و شکل ٦ نحوهٔ اندازه‌گیری ضخامت برفک را نشان می‌دهد). سپس نبشی برداشته می‌شود و بعد از روشن شدن دستگاه و پس‌از طی زمان مطلوب دوباره نبشی گذاشته می‌شود و فاصلهٔ نبشی از سطح برفک دوباره خوانده می‌شود. با کم کردن این دو عدد از یکدیگر ضخامت برفک به‌دست می‌آید.



شکل ۵ وسیلهٔ اندازه‌گیری ضخامت برفک و محل قرارگیری آن

برای این‌که دمای سر عمق‌سنج با دمای برفک هم‌اندازه باشد و سر عمق‌سنج سبب ذوب شدن برفک نشود، در طی انجام آزمایش، عمق‌سنج برروی صلیب طوری قرار می‌گیرد که سر آن برروی استوانهٔ سرد قرار گیرد و دمای آن با سطح سرد به تعادل برسد.

به‌علاوه برای این‌که لحظهٔ مماس شدن سر عمق‌سنج با برفک‌ها به‌خوبی دیده شود، از یک عدد ذره‌بین با بزرگ‌نمایی مناسب استفاده شده‌است تا بتوان به‌خوبی این لحظه را دید.



شکل ٦ نحوهٔ اندازه‌گیری ضخامت برفک

رطوبت نسبی هوا. رطوبت نسبی هوای مرطوب توسط یک رطوبت‌سنج دیجیتالی با دقت 1 درصد اندازه‌گیری شده‌است.

دمای استوانه و هوا. برروی استوانه به‌جز درجهٔ حرارت، گرادیان دما درراستای طول استوانه و گرادیان

دما درراستای محیطی باید اندازه‌گیری شود.

برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی نیز از ترموکوپل نوع k استفاده شده‌است که دقت 0.1 درجهٔ سانتی‌گراد دارد. اندازه‌گیری دما درراستای محیطی، توسط چهار پروب در یک مقطع و در چهار زاویهٔ اصلی از نقطهٔ سکون برروی سطح ثابت می‌شوند و بعد از نیم ساعت از شروع به کار سیستم تبرید، ترمومتر برروی حالت داده‌برداری خودکار قرار می‌گیرد تا هم تغییر دما درطی زمان و هم درراستای محیطی را ذخیره کند. تغییر درطی زمان دارای نوسان‌های بسیار کم با دامنهٔ 0.2 درجه است. این عمل در چهار مقطع انجام شد که نتیجهٔ آن بسیار مشابه با مقطع اولیه بود. برای اثبات تکرار پذیر بودن این رفتار، این عمل سه دفعه تکرار شد که همبستگی مناسبی بین داده‌ها مشاهده شد. استفاده از ژل سیلیکون به این علت است که این ژل دارای ضریب هدایت حرارتی بسیار بالا می‌باشد و خطای کمی را در اندازه‌گیری ایجاد می‌کند. همچنین از حرکت سر پروب می‌تواند جلوگیری کند.

بررسی پارامترهای مؤثر برای اندازه‌گیری. معادلات انرژی و انتقال جرم استفاده شده مطابق رابطهٔ (۱ و ۲) می‌باشد [2].

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\frac{\partial T}{\partial x_i}=\frac{k}{\rho c_p}\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \qquad (۱)$$

$$\rho_a\frac{\partial \omega_a}{\partial t}+\rho_a u_i\frac{\partial \omega_a}{\partial x_i}=\rho_a D\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^2} \qquad (۲)$$

بااستفاده از رابطهٔ (۳)، روابط (۱ و ۲) به‌صورت بدون بعد مطابق رابطهٔ (٤ و ٥) می‌باشد.

$$y_f^*=\frac{y_f}{d},T_p^*=\frac{T_{pipe}}{T_{tp}},T_a^*=\frac{T_{air}}{T_{tp}},T_{fs}^*=\frac{T_{air}-T_{fs}}{T_{air}-T_{pipe}} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial T_a^*}{\partial Fo}+(\mathrm{Re.Pr})u_i^*\frac{\partial T_a^*}{\partial x_i^*}=\frac{\partial^2 T_a^*}{\partial x_i^{*2}} \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial \omega_a}{\partial Fo}+(\mathrm{Re.Pr})u_i^*\frac{\partial \omega_a}{\partial x_i^*}=\frac{1}{Le}\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^{*2}}=\frac{Pr}{Sc}\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_i^{*2}} \qquad (٥)$$

که در معادلهٔ (٥) فرض می‌شود که عدد لویس ثابت باشد [2].

مطابق معادلات (٥-۱) در جریان اجباری هوای مرطوب، ضخامت برفک تابعی از متغیرهای بی‌بعد زیر می‌باشد [2].

$$\delta=f(\mathrm{Re},\mathrm{F}o,\omega_{air},T_a^*,T_p^*) \qquad (٦)$$

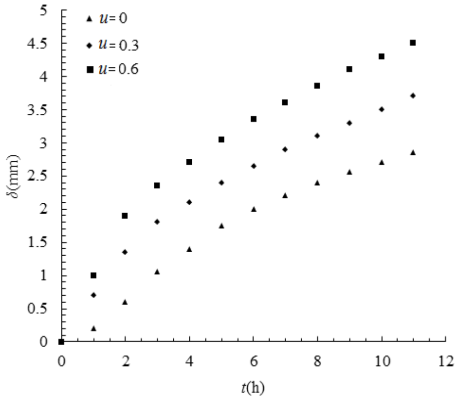
که در آن، δ ضخامت برفک برحسب mm، Re عدد رینولدز ($\mathrm{Re}=\frac{ud}{\nu}$)، Fo عدد فوریه ($Fo=\frac{\alpha t}{d^2}$)، ω_{air} نسبت رطوبت، T_a^* دمای بی‌بعد هوا ($T_a^*=\frac{T_a+273.15}{T_{tp}}$)، T_p^*دمای بی‌بعد استوانه ($T_p^*=\frac{T_p+273.15}{T_{tp}}$) می‌باشد.

درنتیجه باتوجه به رابطهٔ (٦) پارامترهای اندازه‌گیری مؤثر ضخامت برفک، دمای سطح، دمای محیط، رطوبت هوا، ظرفیت گرمایی و سرعت هوای محیط می‌باشد.

بررسی نتایج

درابتدا تأثیر سرعت برروی ضخامت برفک برای سطح صاف و سپس تأثیر دمای سطح بر ضخامت برفک برای سطح زبر فولادی با تعداد مش 50 بررسی می‌شود و پس‌از آن تأثیر سطح فولادی با زبری متفاوت بر ضخامت برفک مورد مطالعه قرار می‌گیرد و درانتها به بررسی تأثیر جنس سطح زبر برروی ضخامت برفک پرداخته می‌شود.

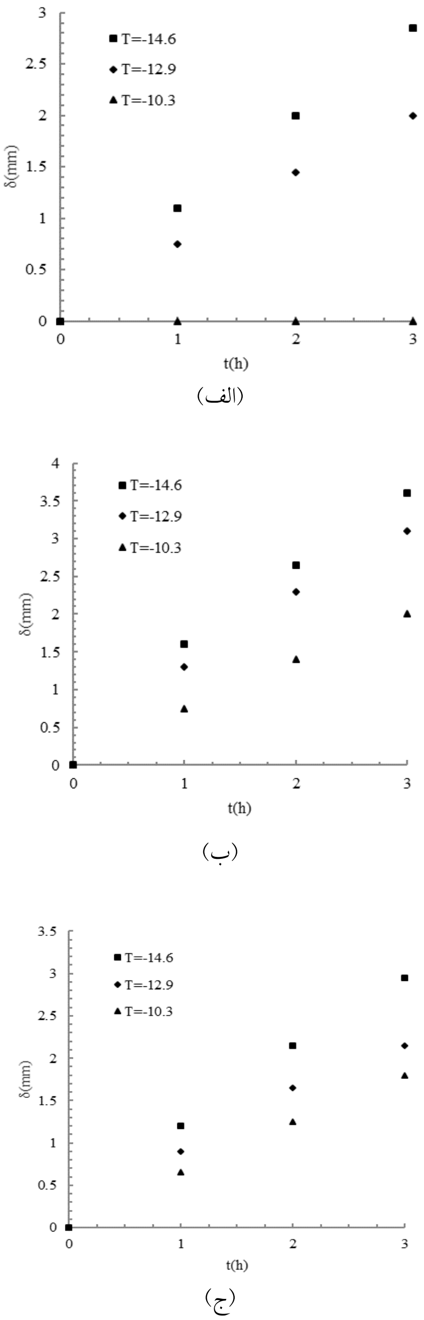
مطابق شکل (۷) با افزایش سرعت، عدد رینولدز و ضریب‌های انتقال حرارت و جرم نیز افزایش می‌یابد و با زیاد شدن انتقال جرم، مقدار رشد برفک نیز زیاد و ضخامت برفک زیاد می‌گردد.



شکل ۷ ضخامت برفک در جلوی استوانه برای دمای سطح 14.6- درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی 36 درصد، دمای هوای 17 درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت هوای متفاوت

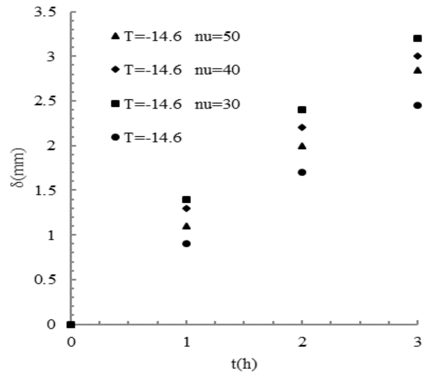
شکل (۸-الف-ج) میزان ضخامت برفک را به‌ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50 و دمای سطح 14.6-، 12.9- و 10.3- درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸) در دمای 10.3- برفک در جلوی استوانه به‌دلیل برخورد مستقیم هوا با سطح استوانه تشکیل نمی‌شود و با کاهش دمای سطح ضخامت برفک افزایش می‌یابد. در پشت و بالای استوانه در سه دمای مورد بررسی برفک تشکیل می‌شود و با کاهش دما ضخامت برفک افزایش می‌یابد. ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در جلوی استوانه کمینه است.

شکل (۹- الف-ج) میزان ضخامت برفک را به‌ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50، 40، 30 و سطح صاف نشان می‌دهد.

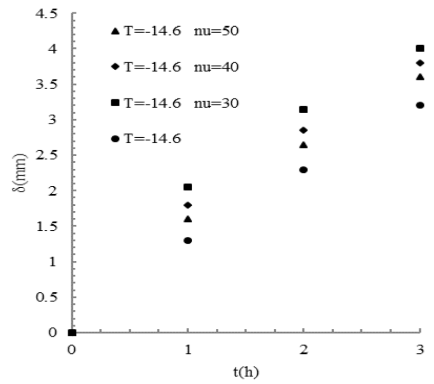


شکل ۸ میزان ضخامت برفک برای دمای سطح مختلف و برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50 در (الف) جلوی استوانه، (ب) پشت استوانه و (ج) بالای استوانه

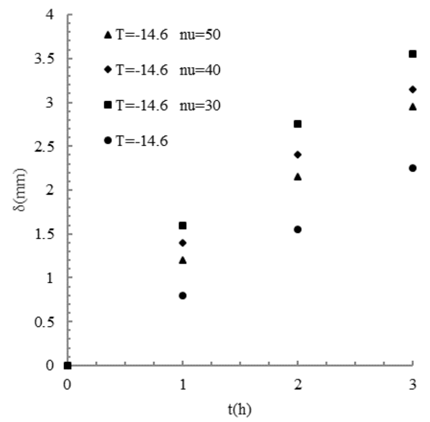
مطابق شکل (۹) هرچه تعداد شبکهٔ سطح افزایش یابد یا به‌عبارتی زبری سطح کاهش یابد، ضخامت برفک کاهش می‌یابد که این نتیجه برای جلو، بالا و پشت استوانه مشابه می‌باشد و همچنین سطح صاف دارای کمترین ضخامت است.



(الف)



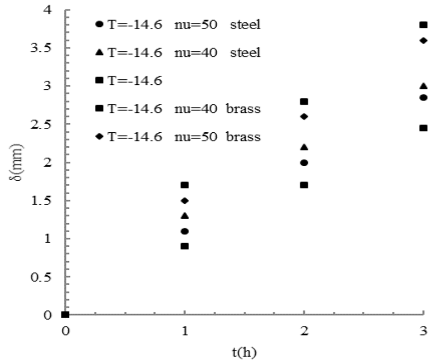
(ب)



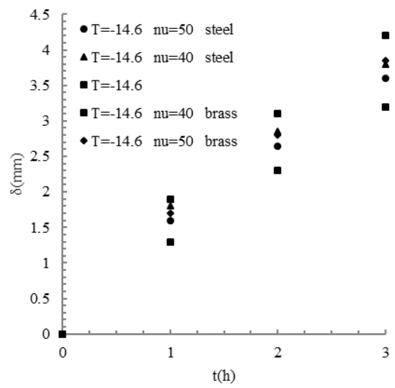
(ج)

شکل ۹ میزان ضخامت برفک برای سطح فولادی دارای زبری متفاوت و سطح صاف: (الف) در جلوی استوانه، (ب) در پشت استوانه و (ج) در بالای استوانه

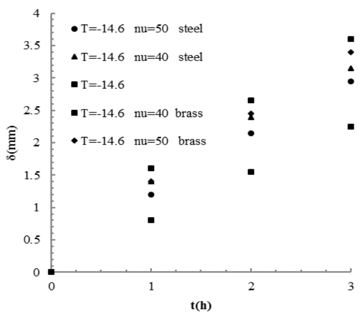
شکل (۱۰-الف-ج) میزان ضخامت برفک را به‌ترتیب در جلو، پشت و بالای استوانه برای سطح فولادی دارای زبری با تعداد مش 50، 40، سطح برنجی دارای زبری با تعداد مش 50، 40 و سطح صاف نشان می‌دهند. مطابق شکل (۱۰) سطح صاف دارای کمترین ضخامت برفک و سطح برنجی با زبری بیشتر دارای بیشترین ضخامت برفک می‌باشد. همچنین با زبری برابر سطح برنجی نسبت به سطح فولادی دارای ضخامت برفک بیشتری است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰ میزان ضخامت برفک برای سطح فولادی دارای زبری متفاوت، سطح برنجی دارای زبری متفاوت و سطح صاف: (الف) جلوی استوانه، (ب) پشت استوانه و (ج) بالای استوانه

نتیجه‌گیری

در جریان اجباری هوای مرطوب تأثیر زبری سطح و همچنین جنس سطح زبر برروی ضخامت برفک به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر به‌دست آمد.

- ضخامت برفک در پشت استوانه بیشینه و در جلوی استوانه کمینه می‌باشد.
- با ایجاد زبری روی سطح میزان ضخامت برفک بیشتر می‌شود.
- هرچه سطح زبر ایجادشده دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری باشد میزان ضخامت برفک بیشتر خواهد بود.

فهرست علائم

brass	جنس سطح برنجی
d	قطر استوانه (cm)
nu	تعداد شبکه‌های سطح
t	زمان (s)
steel	جنس سطح فولادی
T	دمای سطح استوانه (°C)
δ	ضخامت برفک (mm)
Fo	عدد فوریه
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
T	دما (°C)
Ta	دمای هوای محیط (°C)
Tp	دمای سطح استوانه (°C)
Ta*	دمای بی‌بعد هوا
Tp*	دمای بی‌بعد استوانه
Ttp	دمای نقطهٔ سه‌گانه (K)
y*	ضخامت بی‌بعد برفک
α	ضریب نفوذ گرمایی (m2/s)
ν	ویسکوزیتهٔ سینماتیک (Pa.s)
Φ	رطوبت نسبی
ω	نسبت رطوبت ($\frac{kg}{kgair}$)

مراجع

1. Barzanoni, Y., Noorshams, O., Basirat Tabrizi, H. and Damangir, E., "Experimental Investigation of Frost Formation on a Horizontal Cold cylinder under Cross Flow", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 1174-1180, (2011).
2. Barzanoni, Y., Basirat Tabrizi, H., Noorshams, O. and Eftekhari, H., "Correlation for Frost Properties on a Cold Cylinder Surface in Cross Flow", *Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1477-1484, (2012).
3. Li, A., Niu, F., Zheng, H., Akagawa, S., Lin, Z. and Luo, J., "Experimental Measurement and Numerical Simulation of Frost Heave in Saturated Coarse-grained Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 137, pp. 68-74, (2017).
4. Fletcher, N.H., "*The Chemical Physics of Ice*", Cambridge University Press, Cambridge, (1970).
5. Sanders, C.T., "The Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Air Cooler", PhD Thesis, Delft Technical University, Delft, (1974).
6. Raju, S.P. and Sherif, S.A., "Frost Formation and Heat Transfer on Circular Cylinder in Cross Flow", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 16, pp. 390-401, (1993).
7. Amini, M., Pishevar, A.R. and Yaghoubi, M., "Experimental Study of Frost Formation on a Fin-and-tube Heat Exchanger by Natural Convection", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 46, pp. 37-49, (2014).

8. Chen, Y., Lu, P., Shen, C. and Zhang, Q., "Experimental Study on Frost Formation on a Cold Surface in Low Atmospheric Pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, pp. 86-93, (2015).
9. Kim, H., Kim, D., Jang, H., Kim, D.R. and Lee, K.S., "Microscopic Observation of Frost Behaviors at the Early Stage of Frost Formation on Hydrophobic Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 861-867, (2016).
10. Liu, Z., Dong, Y. and Li, Y., "An Experimental Study of Frost Formation on Cryogenic Surfaces under Natural Convection Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 569-577, (2016).
11. Gong, J., Sun, J. and Li, G., "An Experimental Study of the Effect of Air Quality on Frosting on Cold Flat Surface", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 82, pp. 139-144, (2017).